

ACELERACIONES REGISTRADAS Y CALCULADAS DEL SISMO DEL 12 DE AGOSTO DE 2014 EN QUITO

**Roberto Aguiar⁽¹⁾, Alicia Rivas⁽¹⁾, María Belén Benito⁽²⁾, Jorge Gaspar-Escribano⁽²⁾
Santiago Trujillo⁽¹⁾, Susana Arciniegas⁽³⁾, Paola Villalba⁽⁴⁾, Humberto Parra^(1,2)**

⁽¹⁾Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos.
raguiar@espe.edu.ec

⁽²⁾Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía
Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Geografía, Geodesia y Cartografía
Universidad Politécnica de Madrid

⁽³⁾Departamento de Ingeniería Ambiental
Facultad de Geología, Minas, Petróleo y Ambiental
Universidad Central del Ecuador

⁽⁴⁾Departamento de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad Central del Ecuador

RESUMEN

El 12 de agosto de 2014, se registró un sismo de magnitud 5.1, a una profundidad focal de 4 km., en el segmento de falla Bellavista Catequilla, el mismo que fue registrado en 8 estaciones localizadas en la ciudad de Quito. Estas se encuentran ubicadas a distancias epicentrales entre 12 y 19 km.

En este artículo se comparan las aceleraciones máximas obtenidas en campo libre, con las que se obtienen al emplear las ecuaciones de movimientos fuertes de Campbell y Borzognia (2013) y el de Zhao *et al.* (2006). Para ello previamente se determina un plano de ruptura del sismo, utilizando las ecuaciones propuestas por Leonard (2010) y la geometría de las fallas ciegas propuestas por Alvarado (2014).

ABSTRACT

On August 12th 2014, a magnitude 5.1 earthquake occurred at a depth of 4 km, in the Bellavista Catequilla fault segment. This event was recorded by 8 strong-motion stations located between 12 and 19 km from the epicenter, in the city of Quito.

In this article, the maximum ground accelerations recorded in free field are compared with the accelerations estimated using the models by Campbell y Borzognia (2013) and Zhao *et al.* (2006). To this end, the earthquake rupture plane is determined using the equations proposed by Leonard (2010) and the geometry of the blind fault system of Quito proposed by Alvarado (2014).

Recibido: Septiembre de 2014
Aceptado: Octubre de 2014

1. INTRODUCCIÓN

El martes 12 de agosto de 2014, la naturaleza volvió a recordar a los habitantes de la ciudad de Quito, que sus viviendas se encuentran sobre las fallas ciegas de la ciudad o muy próximas a ellas, al ocurrir un sismo de magnitud 5.1, cuyo epicentro, preliminarmente fue ubicado en las siguientes coordenadas: Latitud -0.06 S; Longitud -78.38 W., y a una profundidad focal de 4 km., de acuerdo al Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional, IPGN. En una revisión posterior el epicentro se ubicó con Latitud 0.05 S; Longitud -78.42 W y una profundidad focal de 5 km.

En la figura 1, se presentan varias ubicaciones del epicentro proporcionadas por el ISC (International Seismological Center, Agencia Sismológica GFZ de Alemania); USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos); NEIC (National Earthquake Information Center) y MOS (Agencia sismológica de Rusia). Los mayores daños se registraron en la zona propuesta por el IPGN, para el epicentro del sismo.

Los sismos asociados a estas fallas inversas son de tipo impulsivo y tienen las siguientes características: son de corta duración; causan demasiado daño en la zona epicentral cuando la magnitud es mayor que 6, pero se atenúan muy rápidamente con la distancia. Para tener una idea del poder destructivo de los sismos impulsivos basta mencionar los sismos de Northridge de 1994 (Estados Unidos) y el de Kobe de 1995 (Japón).



Figura 1 Localización del epicentro del sismo del 12 de agosto de 2014, según distintas agencias.

Con esta acotación, en la tabla 1, se indican las aceleraciones máximas registradas del sismo del 12 de agosto de 2014, a más de 10 km., de distancia epicentral. La mayor aceleración es de 48 gal y fue registrada en la estación PRAM, que se encuentra muy próxima al antiguo aeropuerto de Quito. No se disponen de registros en la zona epicentral pero los correspondientes valores de PGA debieron ser más

grandes que las indicadas en la tabla 1, que son bastante bajas y como era de esperarse solo causaron un gran susto en la mayor parte de la población de Quito.

Tabla 1 Valores de PGA y ubicación de estaciones (Fuente: IGEPN)

Estación	Lat_estac	Long_estac	PGA (gal)	Dist (Km)
PRAM	-0,14	-78,49	48	13
FENY	-0,15	-78,48	38	12
24MA	-0,18	-78,47	18	15
IESS	-0,18	-78,49	31	16
IRDE	-0,20	-78,48	20	17
CIRC	-0,20	-78,49	41	17
CMEA	-0,20	-78,49	31	17
AEPN	-0,21	-78,49	21	19

En los valles de los Chillos y de Túmbaco, que se encuentran aproximadamente a 30 km. del epicentro se sintió como un pequeño temblor. Esto se refleja en el mapa de isosistas presentado en la figura 2 donde puede apreciarse en la zona epicentral su intensidad fue 6 en la escala macro sísmica europea, EMS-98 mientras que en la mayor parte de la ciudad fue de 4, oscilando en los valles entre 3 y 4.

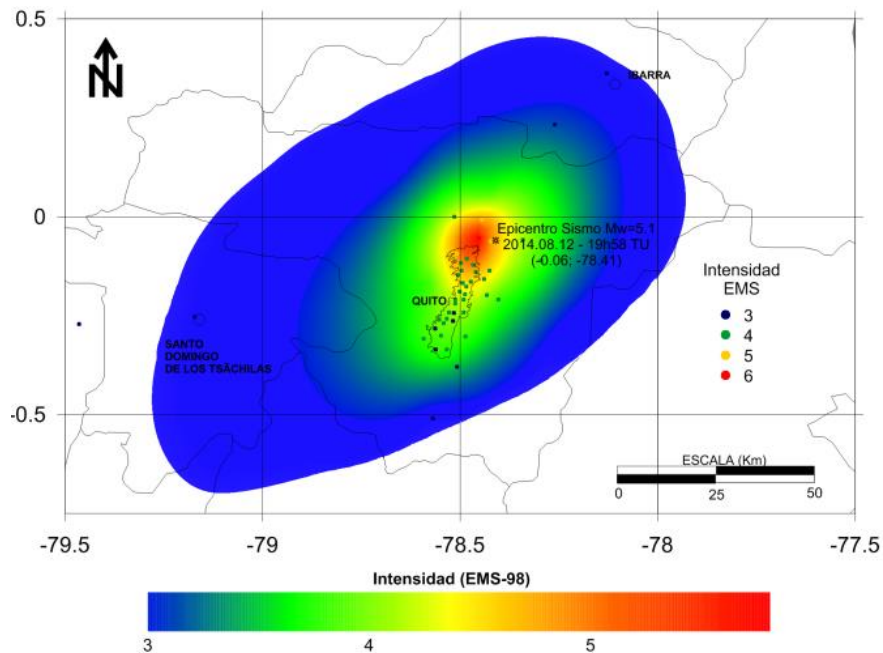


Figura 2 Mapa de isosistas del sismo del 12 de agosto de 2014. Fuente: Singaicho, 2014.

El sismo del 12 de agosto de 2014, puede ser considerado como un recordatorio de que la ciudad de Quito se asienta sobre un sistema de fallas inversas que en la mayor parte no tiene afloramiento superficial, pero hay una serie de evidencias que demuestran su existencia, como es la forma en que se encuentra el material volcánico a la salida del túnel de Guayasamin, en dirección al valle de Tumbaco, o la alineación de las colinas de Ilumbisí y Puengasí.

2. RÉPLICAS DEL SISMO Y NECESIDAD DEL ESTUDIO

Más de 60 réplicas del sismo de Quito de Agosto de 2014 han sido registradas. Las de mayor magnitud se indican en la tabla 2. La ubicación de los epicentros del evento principal y las réplicas se muestra en la figura 3. La cantidad indicada corresponde a la profundidad focal. En la figura 3, se aprecian cuatro de los cinco segmentos que conforman las fallas ciegas de Quito y de sur a norte son: Puengasí; Ilumbisí-La Bota (ILB); Carcelén-El Inca (CEI); Bellavista-Catequilla (BC). Un poco más al norte se halla el segmento de Tangahuilla.

Tabla 2 Ubicación de las réplicas de mayor magnitud del sismo del 12 de agosto de 2014

Fecha	Coordenadas		Magnitud	Profundidad Focal
	Latitud	Longitud		
12/08/2014	-0,05	-78,42	5,1	5,0
12/08/2014	-0,05	-78,4	4,0	5,0
12/08/2014	-0,06	-78,42	3,7	5,0
12/08/2014	-0,05	-78,43	3,3	6,0
12/08/2014	-0,05	-78,41	3,1	6,0
13/08/2014	-0,05	-78,41	3,4	4,0
13/08/2014	-0,05	-78,42	3,3	2,0
13/08/2014	-0,06	-78,42	3,9	5,0
13/08/2014	-0,05	-78,42	3,8	4,0
15/08/2014	-0,07	-78,44	3,0	11,0
16/08/2014	-0,05	-78,41	4,8	4,0
16/08/2014	-0,06	-78,41	3,1	6,0
16/08/2014	-0,05	-78,42	3,7	7,0
16/08/2014	-0,05	-78,41	3,1	5,0
16/08/2014	-0,04	-78,41	3,1	5,0
17/08/2014	-0,03	-78,43	3,0	5,0
17/08/2014	-0,07	-78,43	3,3	7,0
17/08/2014	-0,05	-78,42	4,0	6,0
17/08/2014	-0,07	-78,42	3,0	5,0
21/08/2014	-0,07	-78,41	3,0	4,0
22/08/2014	-0,08	-78,43	3,1	7,0
25/08/2014	-0,08	-78,43	3,3	10,0

En base a esta información se obtuvo la ecuación de recurrencia propuesta por Gutenberg y Richter, la misma que se presenta en la figura 4, donde se aprecia que existe una muy buena correlación entre la magnitud y el número de sismos. La ecuación de ajuste encontrada es la siguiente.

$$\log(N) = 3.0355 - 0.5935 M$$

Donde N , es el número de sismos de magnitud igual o mayor que M .

En la figura 3 se aprecia que este sismo está asociado al segmento: Bellavista-Catequilla. Más adelante se verá que el 10 de agosto de 1990 se produjo un sismo de magnitud $M_w = 5.3$ a pocos

kilómetros del epicentro del sismo de 2014, en el segmento de falla BC. Por lo tanto, en 24 años se ha vuelto a liberar energía.

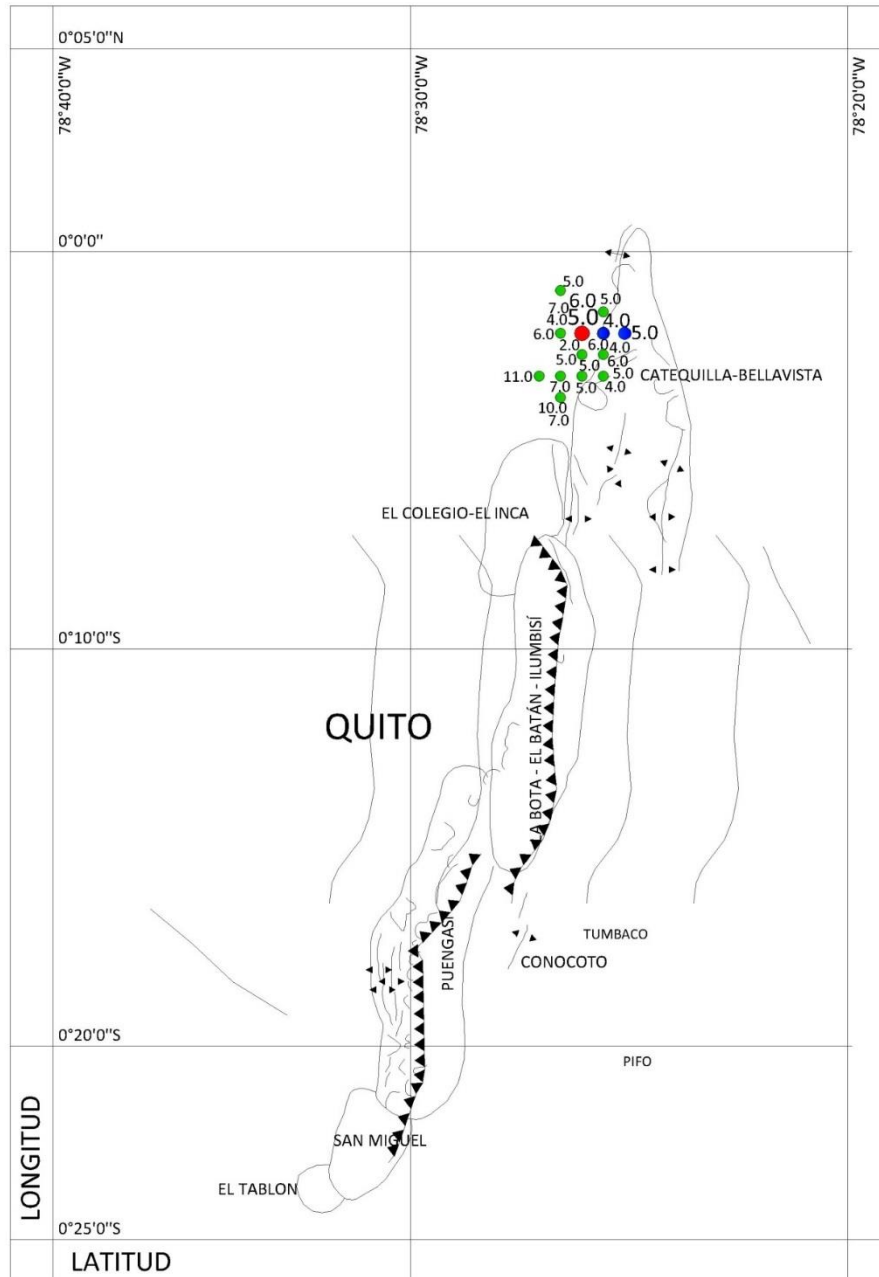


Figura 3 Localización del evento principal y réplicas del sismo del 12 de agosto de 2014

Alvarado *et al.* (2014) en base al modelo del Terremoto Característico, determina para el segmento BC un terremoto de magnitud 6.3, con un período de recurrencia de 183 años. Este cálculo es inquietante para los Proyectistas Estructurales, ya que el período de recurrencia es pequeño y la magnitud es alta para un probable sismo superficial que puede producirse dado que el espectro que genera un sismo de estas características es alto y el período de recurrencia pequeño, se debe verificar que la estructura tenga muy poca incursión en el rango no lineal. Aguiar (2003).

En este artículo se presenta el modelo de Terremoto Característico para determinar el período de recurrencia para el segmento de falla BC y demostrar que efectivamente el período de recurrencia con este modelo es de 183 años, pero es muy importante conocer las hipótesis del modelo para no alarmarse con las magnitudes esperadas en los segmentos de las fallas ciegas de Quito, asociadas a períodos de recurrencia cortos.

Sin embargo es necesario verificar el desempeño estructural ante un sismo muy específico, en la ciudad de Quito, ya que el 70% de sus construcciones se encuentran sobre o muy cerca de las fallas ciegas. Claro está que el diseño de la estructura debe realizarse para los espectros encontrados en el estudio de la microzonificación sísmica de Quito. ERN (2012), Aguiar (2013).

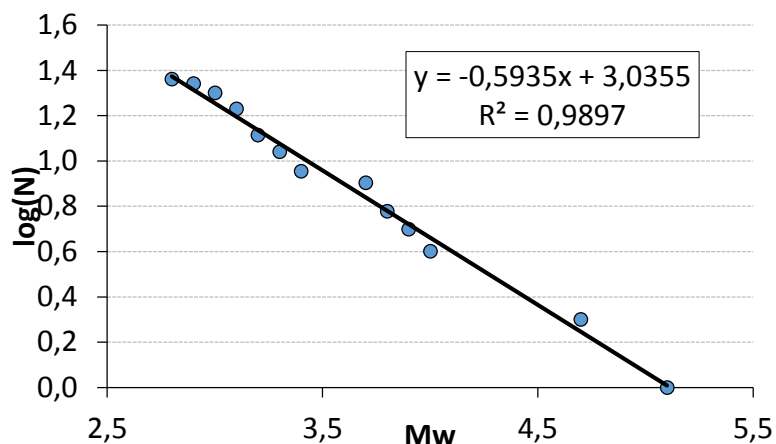


Figura 4 Ajuste de las réplicas con el modelo de Gutenberg y Richter.

3. TECTÓNICA LOCAL

Alvarado *et al.* (2014), al trabajar con las ecuaciones de Leonard (2010) determinan dos magnitudes para cada uno de los segmentos de las fallas ciegas inversas de Quito, las mismas que se indican en la tabla 3. En base al modelo del Terremoto Característico (Wesnousky, 1986) encuentran el período de recurrencia.

Tabla 3 Segmentos de las fallas ciegas de Quito. Alvarado *et al.* (2014).

Segmento	Area ruptura (km) ²	Magnitud (RA)	Longitud de Superficie de Ruptura (km)	Magnitud (SRL)	Período de Recurrencia (años)
Puengasí	259	6.4	22	6.4	188
ILB	176	6.2	15	6.2	138
CEI	82	5.9	7	5.7	105
BC	191	6.3	17.5	6.3	183
Tangahuilla	108	6.0	12	6.0	115

Las ecuaciones propuestas por Leonard (2010) para hallar la magnitud en función de la longitud de ruptura L , con la que se encontró la magnitud (SRL) y para encontrar la magnitud en base al área de ruptura A , con la que determinó la magnitud (RA) son las siguientes, para el caso de levantamiento de un bloque.

$$M_w = 1.52 \log(L) + 4.4 \quad (1)$$

$$M_w = 1.0 \log(A) + 4 \quad (2)$$

En el presente caso, el bloque de Quito se está levantando con respecto a los Valles de los Chillos y Túmbaco por compresión tectónica.

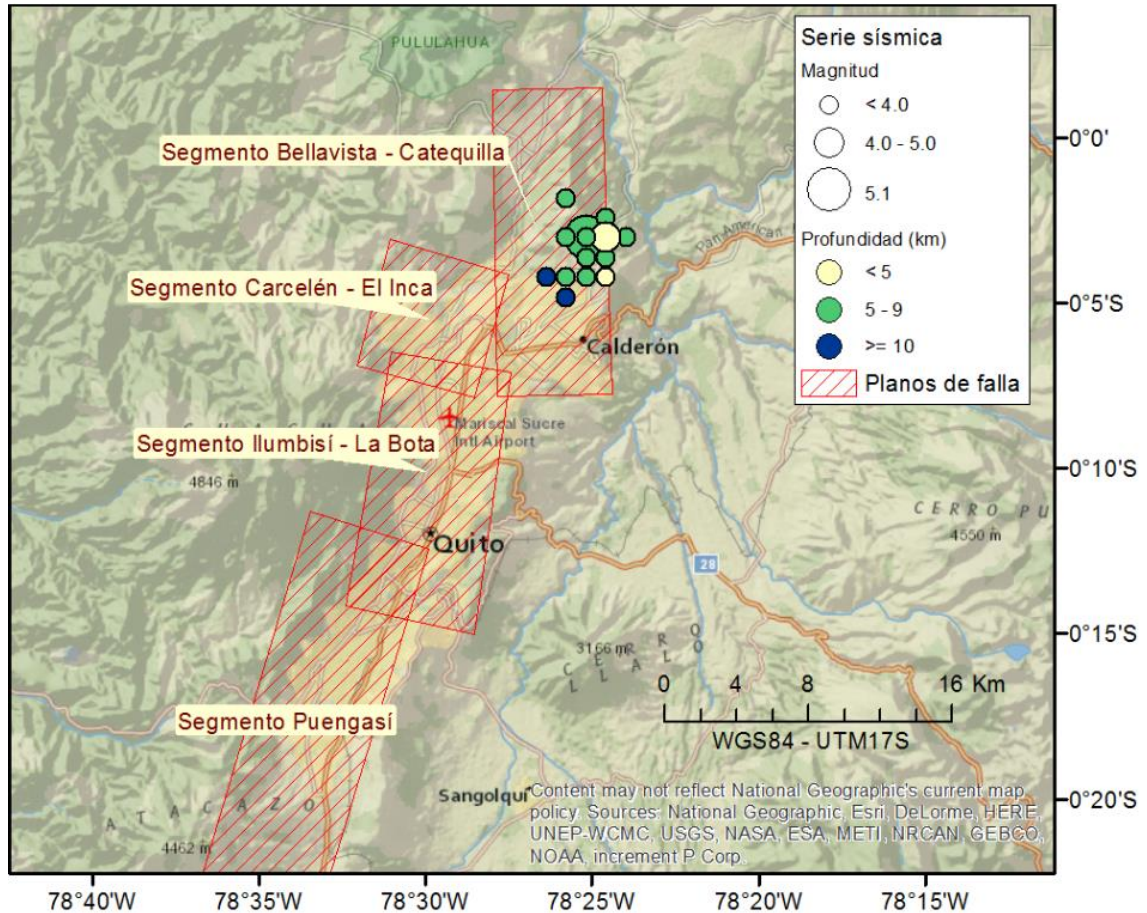


Figura 5 Zonas fuentes locales y réplicas del sismo del 12 de agosto de 2014.

En base al área y longitud de ruptura, indicados en la tabla 3 y en base al ángulo de buzamiento de 55° , Alvarado *et al.* (2014) encontró zonas fuentes locales, para cada uno de los segmentos, de las fallas ciegas de Quito. En la figura 5 se presenta la proyección en la superficie de los planos de falla. De sur a norte los planos corresponden a los segmentos de Puengasí, Ilumbisi la Bota, Carcelén el Inca y Bellavista Catequilla. En esta última zona fuente local se aprecia que el epicentro del sismo del 12 de agosto de 2014 y la mayor parte de las réplicas se ubican dentro de la zona fuente BC.

4. MODELO DEL TERREMOTO CARACTERÍSTICO

El modelo del Terremoto Característico, TC supone que en la falla se producen rupturas que generan un sismo de la misma magnitud con una periodicidad perfecta como se muestra en la figura 6. Se puede pensar que se rompe toda la falla o un segmento pero la cantidad que se considere se va a volver a reproducir en un tiempo constante (Wesnuský 1986).

A modo de ejemplo en la figura 6 se ha supuesto que cada 50 años se genera un sismo que tiene una magnitud máxima M_{TC} (Magnitud Característica). Luego de un terremoto de magnitud M_{TC} la escala de tiempo vuelve a cero y empieza a acumularse la energía. Dado que la falla tiene una tasa de movimiento constante (velocidad) \dot{u} , el nuevo sismo de magnitud M_{TC} se producirá en 50 años, para el caso del ejemplo de la figura 6. Es decir en el ejemplo mostrado el período de recurrencia es de 50 años. Si en este lapso de tiempo se registra un sismo de menor magnitud, esta situación no modifica el período de retorno con el modelo de Terremoto Característico.

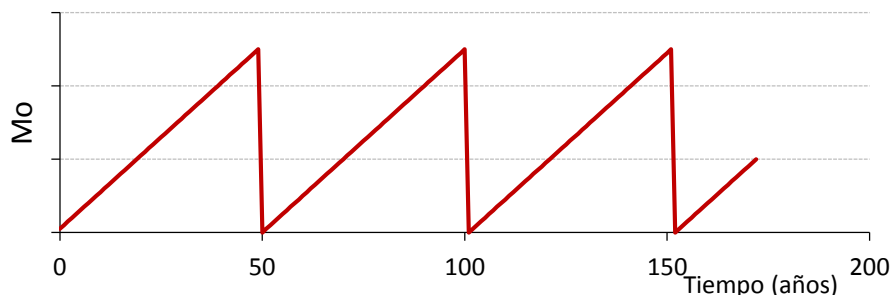


Figura 6 Modelo del Terremoto Característico.

En el caso del segmento de falla BC este sismo tiene una magnitud de 6.3, considerando toda el área de ruptura, y el período de recurrencia asociado a esta magnitud es de 183 años. El modelo supone que una vez que se da el sismo de 6.3, se debe esperar 183 años para tener otro sismo de la misma magnitud; evidentemente si se han registrado ya dos sismos en BC, ocurridos en 1990 y 2014 es lógico pensar que el período de recurrencia va a ser mayor de los 183 años, porque ha habido una importante liberación de energía.

El modelo de Terremoto Característico iguala el momento sísmico acumulado en una falla $Mo_{acumulado}$ durante un tiempo de recurrencia medio T con el momento sísmico liberado $Mo_{liberado}$ en el terremoto de magnitud característica. Lo que significa que toda la energía acumulada en el tiempo de recurrencia T se libera en el sismo de magnitud característica. Numericamente se tiene.

$$\dot{M}_0(Mo_{acumulado}) = \dot{n}(M_{TC}) * M_0(Mo_{liberado}) \quad (3)$$

Donde $\dot{M}_0(Mo_{acumulado})$ es el momento total acumulado en la falla; $\dot{n}(M_{TC})$ es la tasa de momento sísmico anual; $M_0(Mo_{liberado})$ es el momento sísmico liberado. Por otra parte el período de recurrencia no es más que la inversa de la tasa de momento sísmico anual.

Ahora bien, a partir de la longitud o del área de ruptura, se puede encontrar la magnitud máxima esperada en una fuente. En la tabla 3 se ha encontrado esta magnitud para cada uno de los segmentos de las fallas ciegas de Quito empleando las ecuaciones de Leonard (2010). Se pudo trabajar con otras relaciones como las propuestas por Wells y Coppersmith (1994); String *et al.* 2002, entre otras.

Por medio de la expresión de Hanks y Kanamori (1979), se puede conocer el momento sísmico (co-sísmico) que se liberaría en el terremoto de momento máximo a partir del dato de magnitud M_w .

$$M_w = \frac{2}{3} \log(Mo) - 10.7 \quad (4)$$

Con los datos de la tabla 3, para el segmento BC se tiene $M_w = 6.3$, con lo que el momento sísmico liberado, es.

$$Mo = 10^{\frac{(M_w + 10.7)3}{2}} = 3.1623 * 10^{25} \text{ dyn cm} = 3.1623 * 10^{18} \text{ N m}$$

Por otro lado, con la hipótesis conservadora de que en todo el plano de falla se está acumulando la energía en forma uniforme, el momento total acumulado de acuerdo al modelo de Brune (1968) es.

$$M_o = \mu u A \quad (5)$$

Donde μ es el módulo de deformación de las rocas durante el sismo; u es el desplazamiento de la falla; A es el área de ruptura. En la tabla 3 se consideró que $\mu = 3 * 10^{10} Pa$ que es igual a $\mu = 3 * 10^9 \frac{kgf}{m^2}$. Al derivar la ecuación (5) con respecto al tiempo se encuentra.

$$\dot{M}_o = \mu \dot{u} A \quad (6)$$

Donde \dot{M}_o es la tasa de momento sísmico anual; \dot{u} es la tasa de movimiento de la falla, que para el caso del segmento BC se consideró $\dot{u} = 3 \frac{mm}{año} = 0.003 \frac{m}{año}$.

El área de ruptura $A = 191 km^2 = 191 * 10^6 m^2$. Al reemplazar los datos en la ecuación (6) se halla.

$$\dot{M}_o = 3 * 10^9 * 0.003 * 191 * 10^6 = 1.719 * 10^{15} \frac{kgf m}{año} = 1.6846 * 10^{16} \frac{N m}{año}$$

Finalmente el período de recurrencia T se halla con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{M_o}{\dot{M}_o} \quad (7)$$

Donde M_o es el momento sísmico liberado durante el sismo y \dot{M}_o es la tasa de acumulación del momento sísmico.

$$T = \frac{3.1623 * 10^{18} N m}{1.6846 * 10^{16} \frac{N m}{año}} = 187.7 años$$

El valor estimado es del orden del calculado por Alvarado *et al.* (2014) indicado en la tabla 3. Este es de 183 años, siendo la diferencia con el estudiado de menos de 5 años, atribuible a los decimales de cálculo.

5. AREA DEL PLANO DE RUPTURA

Para la determinación del área del plano de ruptura del sismo del 12 de agosto de 2014, se utiliza las ecuaciones propuestas por Leonard (2010) para el caso de un sismo asociado a una componente vertical del movimiento de suelo; estas ecuaciones son la (1) y la (2) indicadas al principio.

Al reemplazar $M_w = 5.1$ en las ecuaciones 1 y 2 se halla que la longitud de ruptura es de 2.9 km, y el área de ruptura es 12.6 km². Al modelar el área del plano de ruptura como un rectángulo se encuentra que el ancho del plano de ruptura es $W = 4.4 km$. En la figura 7 se presenta la proyección del plano de ruptura en la superficie y la ubicación del sismo principal y las réplicas, según la ubicación dada por el IGP. N.

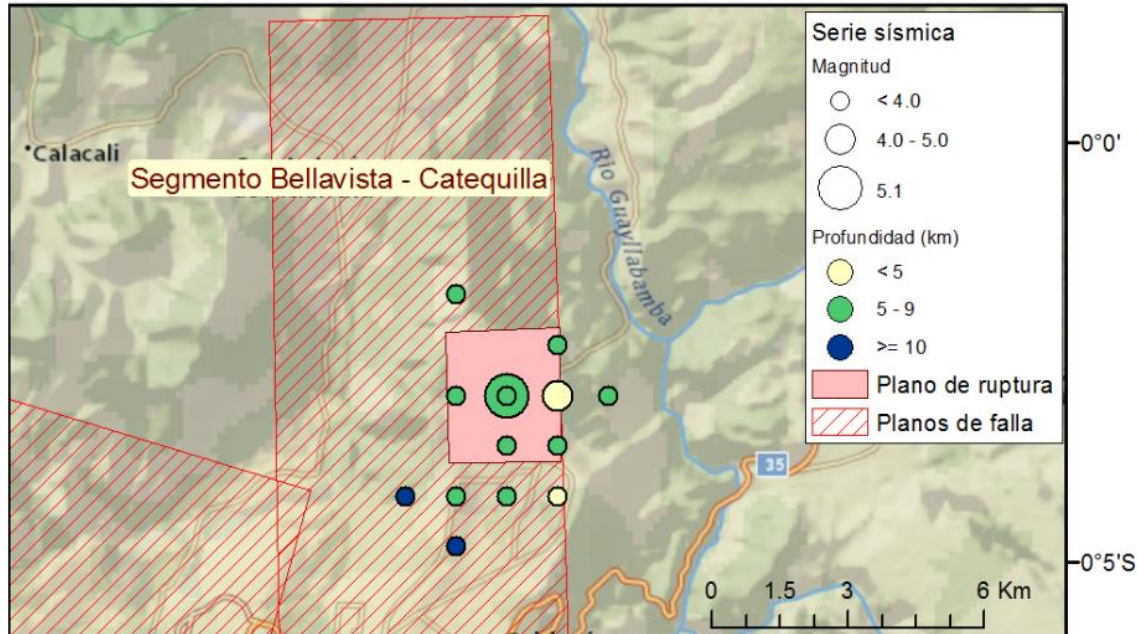


Figura 7 Plano de ruptura del sismo del 12 de agosto de 2014

6. MODELOS DE MOVIMIENTO FUERTE

6.1. Modelo de Campbell y Borzognia 2013

En 2008, Campbell y Borzognia, propusieron la siguiente ecuación para determinar la aceleración del suelo:

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} \quad (8)$$

Donde f_{mag} es una función de la magnitud M_w ; f_{dis} es una función de la magnitud y de la distancia del sitio al plano de ruptura R_{rup} ; f_{flt} depende de la magnitud y del tipo de falla; f_{hng} es una función que depende del efecto hanginwall, la ciudad de Quito se encuentra en el bloque que se está levantando; f_{site} es una función que toma en cuenta los efectos de sitio y depende fundamentalmente de V_{s30} velocidad de la onda de corte en los primeros 30 metros; f_{sed} es una función que toma en cuenta el efecto de cuenca, depende de $Z_{2.5}$ que es la velocidad de la onda de corte a una profundidad de 2.5 km; Y es la aceleración del suelo esperada como una fracción de la gravedad.

Ahora, bien, la nueva ecuación propuesta por C & B 2013 es la siguiente.

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atn} \quad (9)$$

El significado de los términos que faltan es como sigue: f_{hyp} es una función que depende de la profundidad focal Z_{hyp} ; f_{dip} es una función que depende del ángulo de buzamiento de la falla δ y de la magnitud; f_{atn} es una función de la atenuación anelástica.

Como se podrá apreciar la ecuación propuesta en 2013, es un complemento de la ecuación propuesta en 2008 y además se ha incorporado a la base de datos los siguientes sismos ocurridos en: 2006, California $M=6$; 2008, China $M=7.9$; 2009, Italia $M=6.3$; 2010, México $M=7.0$; 2010, Nueva Zelanda $M=7.0$; 2011 Nueva Zelanda $M=6.2$. Lógicamente toda esta información más el nuevo conocimiento científico que se da día a día, llevo a C & B a presentar una nueva ecuación con la cual se pueden determinar espectros de respuesta elástica asociados a un determinada falla geológica cortical o leyes de atenuación de movimiento del suelo para diferentes períodos.

6.2. Modelo de Zhao *et al.* 2006

El modelo de Zhao *et al.* 2006, permite predecir el movimiento del suelo y encontrar espectros para tres regímenes tectónicos: corteza activa, subducción interplaca y subducción intraplaca. La mayor parte de la base de datos de este modelo proviene de estas dos últimas fuentes sísmicas y en su mayor parte fueron registrados en Japón. La ecuación de este modelo es la siguiente:

$$\ln(Y) = a M_w + b X - \ln(r) + e (h - h_c) \delta_h + F_R + S_I + S_S + S_{SL} \ln(X) + C_k \quad (10)$$

Donde M_w es la magnitud; X es la distancia a la fuente en km., que en el anterior modelo se denomina R_{rup} ; r es una función que depende de la magnitud y de la distancia; h es la profundidad focal en km.; F_R es un factor que solo se considera en sismos corticales provenientes de falla inversa; S_I factor de corrección por distancia para sismos de interface; S_S, S_{SL} factores de corrección por distancia para sismos intraplaca; C_k es un factor que considera los efectos de sitio por efecto del suelo; la clasificación de suelos que considera el modelo es la de la guía NEHRP en que se clasifica el suelo en función de la velocidad de la onda de corte V_{s30} . Los restantes parámetros de la ecuación (10) vienen tabulados en función del período.

Tanto con las ecuaciones indicadas, para los modelos de C & B (2013) como la de Zhao *et al.* (2006) no se ha incluido las funciones con las cuales se evalúan la dispersión que tiene la base de datos utilizadas por lo que la probabilidad de excedencia al usar las ecuaciones en la forma presentada es del 50%.

7. CÁLCULO DE ACELERACIONES MÁXIMAS

En la tabla 4, se presentan las variables que se requieren para calcular la aceleración máxima del suelo con los modelos indicados. Falta por indicar el significado de R_x es la distancia más cercana a la proyección de la superficie del borde superior del plano de ruptura medido perpendicularmente a su rumbo promedio; R_{jb} es la distancia mínima a la proyección de la superficie del plano de ruptura (es la distancia Joyner-Boore).

El cálculo se hizo considerando una magnitud $M_w = 5.1$; y profundidad focal $Z_{hyp} = 5 \text{ km.}$ La profundidad del techo del plano de ruptura co-sísmica $Z_{tor} = 3.2 \text{ km.}$, la profundidad al fondo del plano de ruptura $Z_{bot} = 6.78 \text{ km.}$

Lamentablemente no se conoce el valor de V_{s30} para los lugares en que se hallan las estaciones, pero en la microzonificación sísmica de Quito, se tienen valores para sitios cercanos por lo que se decidió trabajar con un solo valor de $V_{s30} = 400 \text{ m/s}$, en el modelo de C & B y corresponde a un suelo tipo C, en el modelo de Zhao *et al.* 2006. En la tabla 5 se presentan las aceleraciones registradas y las calculadas con los dos modelos.

Tabla 4 Valores de R_{rup} , R_x , R_{jb} , que se necesitan en los modelos

Estación	R_{rup} (km.)	R_x (km.)	R_{jb} (km.)
PRAM	14.0135	13.1786	11.4452
FENY	13.2830	12.3246	10.7952
24MA	15.3706	14.5364	13.4113
IESS	16.1877	15.4530	14.0638
IRDE	17.6084	16.8987	15.8075
CIRC	17.8359	17.1587	15.9690
CMEA	17.9253	17.2605	16.0440
AEPN	19.4742	18.8749	17.7317

Tabla 5 Aceleraciones registradas y calculadas del sismo del 12/08/2014

Estación	Distancia Epicentral (km.)	Aceleración registrada (gal)	Aceleración calculada	
			C & B 2013 (gal)	Zhao <i>et al.</i> 2006 (gal)
PRAM	13	48	60.9	63.3
FENY	12	38	64.8	66.7
24MA	15	18	54.5	57.7
IESS	16	31	51.1	54.8
IRDE	17	20	45.9	50.3
CIRC	17	41	45.2	49.6
CMEA	17	31	44.9	49.3
AEPN	19	21	40.4	45.3

Antes de comparar las aceleraciones se debe tener en cuenta que la distancia epicentral de cada una de las estaciones reportadas por el IPGH no tienen decimales cuando deberían tenerlo debido a que se encuentran en diferentes sitios.

Por otra parte, la base de datos con las que se han obtenido las ecuaciones de C & B y de Zhao *et al.* 2006 presentan para una misma distancia epicentral una gran dispersión de los valores al trabajar con el valor medio la probabilidad de excedencia es del 50% si se desea minimizar está probabilidad se lo debe hacer en términos generales con dos variables denominadas σ, ε ; la primera corresponde a la desviación estándar y la segunda el número de veces que se considera la desviación estándar, si $\varepsilon = 1$ o 2 por ejemplo la probabilidad de excedencia se reduce al 16 y 5% respectivamente, pero los valores de ε también pueden ser negativos. (Ramírez *et al.* 2008) Los valores presentados en la tabla 5 son para $\varepsilon = 0$ con lo que la probabilidad de excedencia es del 50%.

Las aceleraciones máximas se hallan con el modelo de Zhao *et al.* 2006 pero son parecidas a las que se obtienen con el modelo de C & B 2013, como se aprecia en la figura 8. Se ve que para algunos puntos las aceleraciones que reportan los modelos son parecidas a las que se registraron a pesar de que en los modelos se considera $\varepsilon = 0$.

A 17 km., del epicentro se tienen aceleraciones máximas en campo libre, que varían entre 20 y 41 gal. Dos de estos registros fueron obtenidos en la parte baja de la ciudad y corresponden a las estaciones del Colegio Militar Eloy Alfaro (CMEA) y del Círculo Militar (CIRC) que están muy cercanas, en estas se registró 31 y 41 gal, respectivamente, la restante fue en el IRD ubicado en la Whymper y Coruña (IRDE) que se encuentra a mayor elevación y en mejor suelo. Evidentemente que estas diferencias son por efectos de sitio.

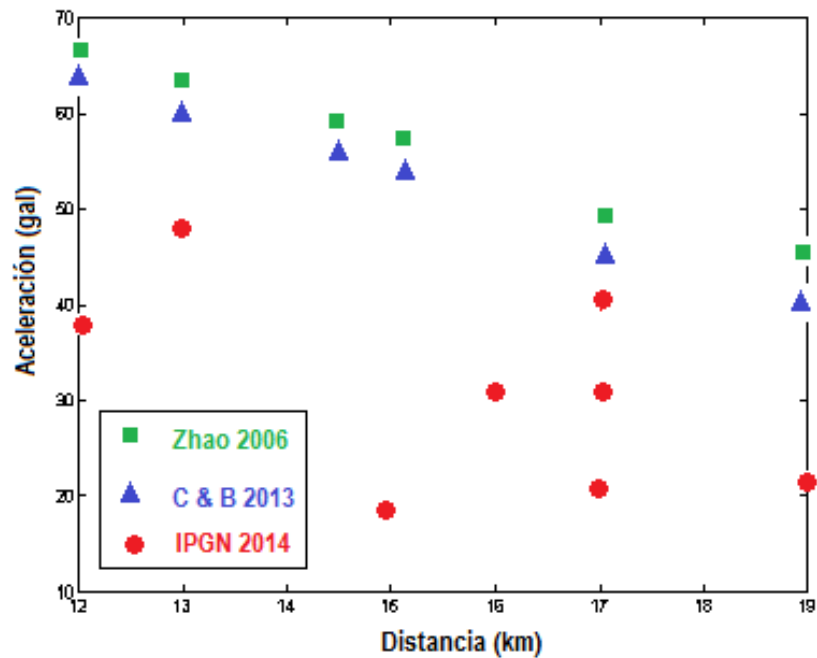


Figura 8 Aceleraciones máximas encontradas y registradas en el sismo del 12/08/2014.

Por otra parte, las aceleraciones máximas registradas, a más de 10 km., del epicentro son bastante bajas, menores a $0.05 g$. Siendo g la aceleración de la gravedad, que no causan daño en las estructuras de hormigón armado y acero que se tienen en la zona donde fueron obtenidos los registros sísmicos.

En la figura 9 se presenta la variación del PGA (aceleración máxima) con la distancia R_{rup} , hallados con el modelo de Zhao *et al.* 2006, para $\varepsilon = 0$, línea continua; para $\varepsilon = 1$, línea superior discontinua y la $\varepsilon = -2$, línea inferior discontinua, en este último caso la probabilidad de excedencia es del 95%. Se indican además las aceleraciones registradas.

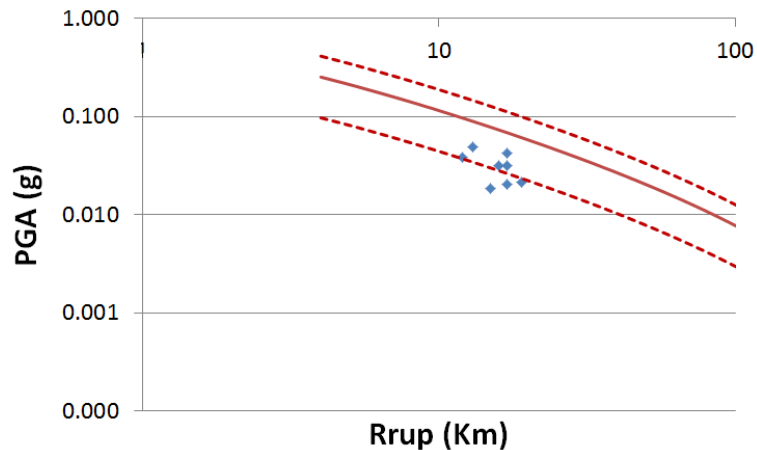


Figura 9 Variación de la aceleración máxima en función de R_{rup} .

8. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Tres puntos principales han sido presentadas en este artículo y son las aceleraciones máximas registradas en campo libre del sismo del 12 de agosto de 2014; los períodos de recurrencia encontrados para los segmentos de las fallas ciegas de Quito y el comportamiento de dos modelos de movimientos fuertes para determinar: aceleraciones máximas del suelo, formas espectrales y leyes de atenuación. Con relación a estos puntos se puede indicar lo siguiente.

Evidentemente en los registros hubo efectos de sitio ya que en lugares que se hallan a la misma distancia se tienen aceleraciones muy diferentes en relación a los valores obtenidos, el valor de la aceleración máxima en la estación IRDE es menos del 50% del valor registrado en la estación CIRC, las dos están a la misma distancia epicentral. Queda de manifiesto que los sismos asociados a las fallas ciegas de Quito, por tener un foco superficial se atenúan muy rápidamente con la distancia.

Con relación a los períodos de recurrencia que son bastante bajos para sismos de gran magnitud se puede decir que estos responden al modelo utilizado, en este caso fue el del Terremoto Característico, que fue ampliamente descrito en el apartado 4, que no considera la liberación de energía que se da cuando se registran sismos de menor magnitud.

Finalmente, los modelos de C & B 2013 y el de Zhao *et al.* 2006 para el presente sismo reportan aceleraciones máximas en campo libre, muy similares. Si se incorporaba la incertidumbre en estos modelos de seguro que se cubría con las aceleraciones registradas pero el objetivo era comparar los resultados medios que reportan las ecuaciones de movimientos fuertes indicadas, con las registradas en el sismo del 12 de agosto de 2014.

REFERENCIAS

1. Aguiar Roberto, (2013), *Microzonificación sísmica de Quito*, Primera Edición. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, Ecuador, 212 p., Quito.
2. Aguiar Roberto, (2003), *Análisis sísmico por desempeño*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 342 p., Quito.
3. Alvarado A., Audin L., Nocquet M., Lagreulet S., Segovia M., Font Y., Lamarque G., Yepes H., Mothes P., Rolandone F., Jarrín P., and Quidelleur X., (2014), "Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity", *Tectonics, AGUPLICATIONS*, 17 p., Article online.
4. Campbell K., Bozorgnia Y., (2013), *NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV and 5%-Damped elastic Pseudo-Acceleration response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec*, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER*, 75 p.
5. ERN-2012, *Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito. Estudio de la amenaza sísmica a nivel local*. Programa de reducción de riesgos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito.
6. Hanks T.C. and Kanamori H. (1979), "A moment magnitude scale". *Journal of Geophysical Research*. 84: 23480-23500.
7. IGPN (2014), *Informes del sismo del 12 de agosto de 2014*, Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional, online.
8. Leonard M., (2010), "Earthquake fault scaling: Self consistent relating of rupture length width, average displacement, and moment release", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100 (SA)**, 1971-1988.
9. Ramírez M., Castañón A., Benito B., (2008) *Proyecto Expel Sistema experto de análisis probabilista de la peligrosidad sísmica*, Consejo de Seguridad Nuclear CSN, 296 p., Madrid.

10. Wells D., and Coppersmith K., (1994), "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 974-1002.
11. Wesnousky S., (1986), *Earthquakes, Quaternary faults, and seismic hazard in California*, J. Geophys. Res., **91 (B12)**, 12587-12631.
12. Singaicho J., (2014), *Evaluación de intensidades sísmicas (Sismo de Calderón 12 de agosto de 2014 14:58 TL)*, Informe del Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional, IGPN, 9 p., Quito.
13. Stirling, M., Rhoades, D., & Berryman, K. (2002), Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the instrumental and preinstrumental era. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(2), 812-830.
14. Stirling, M., Goded, T., Berryman, K., & Litchfield, N. (2013), Selection of Earthquake Scaling Relationships for Seismic-Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
15. Zhao J., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Oouchi T., Takahashi T., Ogawa H., Irikura K., Thio H., Somerville P., Fukushima Y., and Fukushima Y., (2006), "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96 (3)**, 898-913.